

КОЛЛОИДНЫЕ И НАНОРАЗМЕРНЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ В ОРГАНИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ: XXIV.¹ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРИРОВАНИЯ ФУРАНА И ЕГО ПРОИЗВОДНЫХ В ПРИСУТСТВИИ НАНЕСЕННЫХ НА MgO НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА

© 2020 г. Ю. В. Попов*, В. М. Мохов, Д. Н. Небыков, П. М. Ширханян,
Т. А. Гендлер, В. В. Шемет

*Волгоградский государственный технический университет, ул. Дегтярева 2, Волгоград, 400006 Россия
e-mail: tons@vstu.ru*

Поступило в Редакцию 20 декабря 2019 г.

После доработки 20 декабря 2019 г.

Принято к печати 26 декабря 2019 г.

Изучены процессы гидрирования фурана и его производных (2-метилфуран, фурфуроловый спирт, фурфурол) в реакторе проточного типа при атмосферном давлении водорода при температурах 20–220°C в присутствии нанесенных на различные носители наночастиц никеля, полученных химическим восстановлением. Наибольшую активность и стабильность в изученных условиях проявляют наночастицы никеля, стабилизированные на поверхности оксида магния. Данный катализатор позволяет получать соответствующие продукты гидрирования с выходом до 100% при полной конверсии сырья.

Ключевые слова: катализ, наночастицы, никель, кобальт, фурфурол, фуран

DOI: 10.31857/S0044460X20060013

Большое значение для химической промышленности приобретает разработка процессов на основе возобновляемых источников сырья. В настоящее время одним из главных продуктов в процессах переработки биомассы является фурфурол [2], который, в свою очередь, является сырьем для получения целого ряда ценных органических соединений, таких как фурфуроловый спирт, тетрагидрофурфуроловый спирт, 2-метилфуран, 2-метилтетрагидрофуран, фуран и тетрагидрофуран [3, 4].

В промышленности гидрирование фурфуrolа осуществляют в присутствии медно-хромовых катализаторов при высоком давлении до 250 атм и температуре 60–220°C с выходами по фурфуроловому спирту 60–97% [5]. Процессы гидрирования фурфуrolа водородом проводят также при давлении

до 20 атм и температуре до 260°C при катализе наночастицами меди, иммобилизованными на различных носителях. Выход фурфуролового спирта составляет 96% [6–8].

Медные катализаторы также были использованы в процессе гидрогенолиза фурфуrolа с получением 2-метилфурана (51.1–93.5%) при 1–90 атм водорода и 150–280°C [9–11]. Процесс гидрирования фурфуrolа молекулярным водородом в присутствии NiO/SiO₂ при 200°C и 1 атм водорода позволяет получать тетрагидрофурфуроловый спирт с выходом 14.9% [12]. В присутствии Ru/C в жидкой фазе в среде 1-бутанола при 165°C и 25 атм водорода гидрирование фурфуrolа протекает с образованием фурфуролового спирта, конверсия фурфуrolа составляет 91%, выход продукта – 42.4% [13].

¹ Сообщение XXIII см. [1].

Рутениевые катализаторы также были использованы для получения тетрагидрофурурилового спирта гидрированием фурфурилового спирта [14–16]. Реакция протекает при 40–120°C и избыточном давлении 20–60 атм. Никель-палладиевые катализаторы также показали высокую активность в этой реакции. В частности, в присутствии Ni–Pd/SiO₂ при 40°C и 40 атм в течение 2 ч выход тетрагидрофурурилового спирта составляет 96% [17].

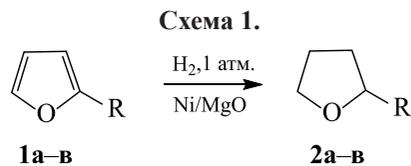
2-Метилтетрагидрофуран с выходом 100% также получают гидрированием 2-метилфурана в присутствии Pd/C при 200°C и молярном соотношении H₂:2-метилфуран = (10–25):1 [18].

Авторами [19–24] описаны процессы гидрирования производных фурана в присутствии родиевых и рениевых катализаторов, приводящие к образованию побочных продуктов гидронолиза и деструктивного раскрытия цикла при температуре до 200°C и давлении 60 атм.

Ранее нами были проведены исследования процессов гидрирования широкого ряда непредельных углеводородов в реакторе проточного типа при атмосферном давлении водорода в присутствии наночастиц никеля, нанесенных на различные подложки [25]. Изученные никелевые наноструктурированные катализаторы продемонстрировали высокую эффективность в этих процессах. Целью данного исследования являлось изучение процессов гидрирования фурана и его производных (2-метилфурана, фурфурилового спирта) в реакторе проточного типа при атмосферном давлении водорода с использованием никелевых и кобальтовых катализаторов, нанесенных на носители: γ -Al₂O₃, цеолит NaX, SiO₂ и MgO (схема 1).

Исследование проводили в реакторе проточного типа (Part 5400 Tubular Reactor System) при температуре 20–220°C, атмосферном давлении, 2.5-кратном мольном избытке водорода, удельном расходе гидрируемого субстрата 0.36 л/(кг_{кт}·ч) без растворителя. Состав реакционной массы анализировали методом спектроскопии ЯМР ¹H, ГЖХ и хромато-масс-спектрометрии.

Катализаторы получали путем пропитки носителя водным раствором соответствующей соли металла в течение 24 ч, фильтрации и промывки дистиллированной водой с последующим восстановлением тетрагидроборатом натрия в воде при



R = H (**а**), CH₃ (**б**), CH₂OH (**в**).

20–25°C [26]. Полученные катализаторы анализировали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе FEI Versa 3D Dual Beam. Рабочее расстояние – 10 мм, детектор вторичных электронов – ETD, детектор обратно рассеянных электронов – CBS, метод элементного анализа – EDS. Морфология поверхности полученных катализаторов имеет различия по форме, размерам частиц и их агломератов. В зависимости от используемого носителя на поверхности образуются частицы металлов от 70–100 нм.

При первоначальной оценке эффективности приготовленных катализаторов в процессах гидрирования фурана **1а** (при 100°C и прочих равных условиях) было обнаружено, что выход целевого продукта **2а** существенным образом зависит от используемого носителя. В присутствии Co⁰/ γ -Al₂O₃ выход продукта гидрирования **2а** и конверсия субстрата **1а** не превышают 1–1.5%, а в присутствии Ni⁰/ γ -Al₂O₃ – 13%. При использовании же в качестве катализатора наночастиц кобальта и никеля, нанесенных на NaX и SiO₂, выходы продукта **2а** не достигают и 4%. Однако применение в качестве носителя MgO позволило значительно увеличить выход целевого продукта **2а**. Так, в присутствии Co⁰/MgO и иных аналогичных условиях выход тетрагидрофурана **2а** и конверсия фурана **1а** составила 20%.

Изучение влияния количества никеля на носителе MgO на выход продуктов гидрирования показало, что наилучшие результаты были получены при соотношении гексагидрата хлорида никеля(II) к MgO, равном 1.2:1. Так, гидрирование соединения **1а** на катализаторе Ni⁰/MgO уже при 25°C привело к образованию продукта **2а** с выходом 68%. Образования продуктов раскрытия цикла в катализате обнаружено не было. Увеличение температуры до 100°C позволяет получать тетрагидрофуран **2а** с выходом 100% (рис. 1). При более высоких температурах наблюдается образование продуктов раскрытия цикла, а именно бутан-1-ола (26%, при 160°C). При этом установлено, что в процессе ги-

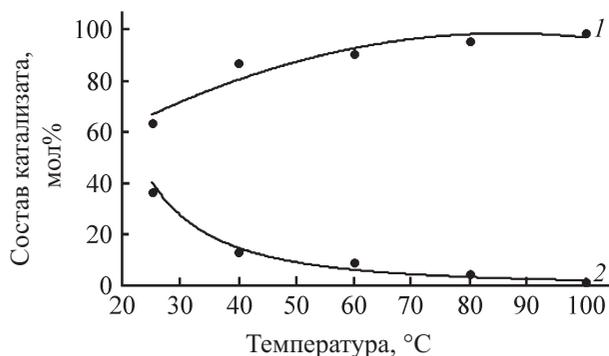


Рис. 1. Зависимость состава катализата от температуры процесса гидрирования фурана при мольном соотношении **1а**:H₂ = 1:2.5 [удельный расход субстрата 0.3 л/(кг_{кат}·ч), Ni⁰/MgO]. 1 – тетрагидрофуран, 2 – фуран.

дирования фурана **1а** в зависимости от температуры в присутствии Ni⁰/MgO выходы продукта **2а** гидрирования и конверсия субстрата **1а** оказались выше на 45–80%, чем в аналогичных условиях в присутствии Co⁰/MgO.

Аналогичным образом в реакцию гидрирования на Ni⁰/MgO вступает и 2-метилфуран **1б**. При удельном расходе гидрируемого субстрата **1б** 0.3 л/(кг_{кат}·ч) и 2.5-кратном мольном избытке водорода при 1 атм и температуре 120°C был получен 2-метилтетрагидрофуран **2б** с выходом до 94% и селективностью 100% (рис. 2). Дальнейшее повышение температуры в этом случае также приводит к образованию продуктов раскрытия фуранового цикла (16.6%, при 140°C).

Следует отметить, что фуран **1а** вступает в реакцию гидрирования легче в изучаемых условиях, чем 2-метилфуран **1б**, что, вероятно, объясняется небольшим стерическим фактором заместителя. Так, при 60°C и иных аналогичных условиях конверсия соединения **1а** оказалось выше конверсии вещества **1б** на 15%. Аналогичные результаты ранее были получены в присутствии катализаторов Адамса [27]. Константа скорости гидрирования фурана **1а** оказалась выше константы скорости гидрирования 2-метилфурана **1б** на 12%.

Процесс гидрирования фурфуролового спирта **1в** на катализаторе Ni⁰/MgO проводили при 100–200°C, удельном расходе спирта **1в** 0.36 л/(кг_{кат}·ч) и 2.5-кратном мольном избытке водорода. Зависимость состава катализата от температуры процесса гидрирования спирта **1в** пред-

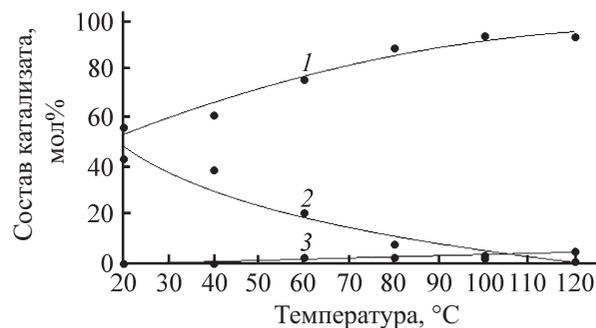


Рис. 2. Зависимость состава катализата от температуры процесса гидрирования 2-метилфурана при соотношении **1б**:H₂ = 1:2.5 [удельный расход 2-метилфурана 0.3 л/(кг_{кат}·ч), Ni⁰/MgO]. 1 – 2-метилтетрагидрофуран, 2 – 2-метилфуран, 3 – продукты раскрытия цикла.

ставлена на рис. 3. Следует отметить, что гидрирование спирта **1в** протекает при более высоких температурах, чем гидрирование соединений **1а** и **1б**. В данном случае выход тетрагидрофурфуролового спирта **2в** 94% был достигнут при полной конверсии сырья только при 200°C, что связано с влиянием на стабильность фуранового кольца как стерического, так и электроноакцепторного факторов CH₂ОН-группы [27].

Важнейшим сырьем для получения фурана и его производных является фурфурол **3**, который синтезируется в процессе переработки биомассы [28]. Процесс гидрирования альдегида **3** на катализаторе Ni⁰/MgO был изучен при температуре 120–200°C, удельном расходе гидрируемого субстрата **3** 0.36 л/(кг_{кат}·ч) и 2.5-кратном мольном избытке водорода (схема 2, рис. 4).

На основании анализа данных экспериментов можно сделать вывод, что в результате снижения активности фуранового кольца в альдегиде **3** к гидрированию (наличие заместителя второго рода HC=O) процесс начинается лишь после восстановления карбонильной группы альдегида **3** до гидроксильной. Полученный спирт **1в** затем гидрируется в соединение **2в**. При этом максимально достигнутый выход спирта **2в** при 200°C составил 53% при полной конверсии альдегида **3**. При дальнейшем повышении температуры увеличивается доля реакций гидронолиза гидроксильной группы спирта **1в** с получением соединения **1б**, содержание которого при 240°C в катализате достигает 13%.

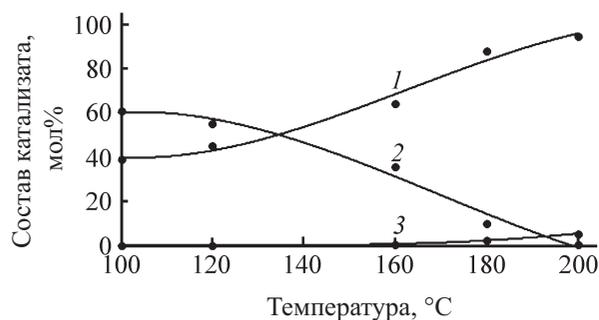


Рис. 3. Зависимость состава катализата от температуры процесса гидрирования фурфурилового спирта при соотношении $1\text{в}:\text{H}_2 = 1:2.5$ [удельный расход фурфурилового спирта $0.3 \text{ л}/(\text{кг}_{\text{кат}} \cdot \text{ч})$, Ni^0/MgO]. 1 – тетрагидрофурфуриловый спирт, 2 – фурфуриловый спирт, 3 – 2-метилтетрагидрофуран.

Следует отметить, что попытка провести нами гидрирование фуранового цикла этилового эфира 2-фуранкарбоновой кислоты в условиях реакции восстановления вещества **3** не увенчались успехом, так как электроноакцепторная этоксикарбонильная группа не подвергается гидрированию в этих условиях.

Таким образом, в результате проведенных исследований было найдено, что наночастицы никеля, стабилизированные на поверхности MgO при давлении 0.1 МПа , проявляют высокую каталитическую активность в процессах гидрирования фурана и его производных в интервале температур $120\text{--}200^\circ\text{C}$, что позволяет получать соответствующие продукты гидрирования с выходами и селективностью до 100% в реакторе проточного типа. Полученные результаты при более детальном изучении кинетических закономерностей и дальнейшей оптимизации могут служить основой для разработки нового энергоэффективного способа гидрирования фурана и его производных.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Хромато-масс-спектральный анализ выполнен на приборе Saturn 2100 T/GC3900 (ЭУ, 70 эВ).

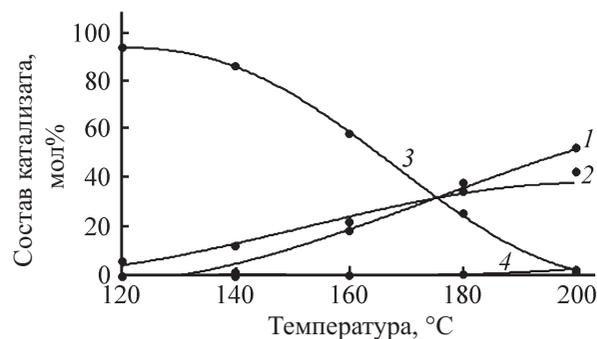
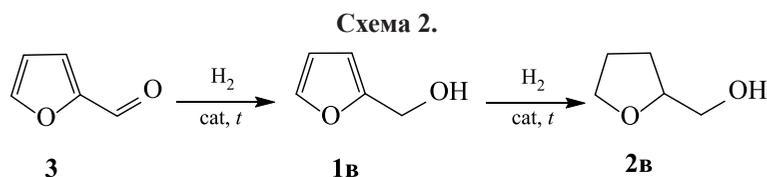


Рис. 4. Зависимость состава катализата от температуры процесса гидрирования фурфуrolа при соотношении $3:\text{H}_2 = 1:2.5$ [удельный расход фурфуrolа $0.3 \text{ л}/(\text{кг}_{\text{кат}} \cdot \text{ч})$, Ni^0/MgO]. 1 – тетрагидрофурфуриловый спирт, 2 – фурфуриловый спирт, 3 – фурфуrol, 4 – 2-метилтетрагидрофуран.

Приготовление катализатора. Катализаторы получали путем пропитки твердого носителя (оксид магния MgO , диоксид кремния SiO_2 , γ -оксид алюминия $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, цеолит NaX) водным раствором гексагидрата хлорида никеля(II) или кобальта(II) в соотношении $0.25\text{--}1.2 \text{ г}$ соли металла к 1 г носителя в течение $5\text{--}6 \text{ ч}$. После фильтрования и промывания дистиллированной водой композит обрабатывали раствором тетрагидробората натрия в воде при $20\text{--}25^\circ\text{C}$ в течение $20\text{--}30 \text{ мин}$. При этом получали катализатор с размерами частиц никеля на поверхности $70\text{--}100 \text{ нм}$ [29]. Восстановленный катализатор загружали в реактор во влажном виде, осушали от воды в токе водорода при $120\text{--}300^\circ\text{C}$ непосредственно перед процессом.

Общая методика проведения гидрирования. Реакции проводили в реакторе вытеснения при атмосферном давлении и температурах $20\text{--}200^\circ\text{C}$. В этом температурном интервале реакция может осуществляться как в газовой фазе, так и в системе газ–жидкость–твердый катализатор, в зависимости от температур кипения исходных веществ. Лабораторный реактор представляет собой трубку из стали 12X18H10T с внутренним диаметром 9 мм и высотой зоны нагрева 50 мм , помещенную в электрическую печь. В средней части реактора разме-



щен слой катализатора, до и после которого находится инертный наполнитель (кварцевая насадка). При различных температурах дозировали жидкие фуран и его производные и устанавливали необходимый расход водорода. Удельная скорость подачи жидких реагентов—0.3 л/(кг_{кат}·ч). Расход водорода—190–230 л/(кг_{кат}·ч) (2.5-кратный мольный избыток). В нижеприведенных примерах использован катализатор, полученный пропиткой гранул пресованного MgO гексагидратом хлорида никеля(II) при массовом соотношении 1.2:1 с последующим восстановлением.

Тетрагидрофуран (2а). а. На катализатор Ni⁰/MgO массой 6 г при температуре 25°C подавали вещество **1а** с расходом 0.3 л/(кг_{кат}·ч) и водород с расходом 230 л/кг_{кат}·ч. Конверсия фурана **1а** 63.5%. Селективность по продукту **2а** 100%, выход 63.5%. Масс-спектр (ЭУ), *m/e* (*I*_{отн}, %): 73.8 (71) [M + 1]⁺, 70.9 (100) [M – 1], 70.0 (8), 69.0 (3), 55.0 (3), 42.9 (2), 42.0 (2), 41.0 (8), 40.1 (2).

б. На катализатор Ni⁰/MgO массой 6 г при 100°C подавали вещество **1а** с расходом 0.3 л/(кг_{кат}·ч) и водород с расходом 230 л/кг_{кат}·ч. Конверсия фурана **1а** 98.7%, селективность по продукту **2а** 100%, выход 98.7%.

в. На катализатор Co⁰/MgO массой 6 г при 100°C подавали вещество **1а** с расходом 0.3 л/(кг_{кат}·ч) и водород с расходом 230 л/кг_{кат}·ч. Конверсия фурана **1а** 20%, селективность по продукту **2а** 100%, выход 20%.

2-Метилтетрагидрофуран (2б). а. На катализатор Ni⁰/MgO массой 6 г при 20°C подавали вещество **1б** с расходом 0.3 л/(кг_{кат}·ч) и водород с расходом 190 л/кг_{кат}·ч. Конверсия 2-метилфурана **1б** 56.5%, выход 56.5%. Масс-спектр (ЭУ), *m/e* (*I*_{отн}, %): 86.7 (3) [M + 1]⁺, 72.7 (5), 56.8 (87), 55.8 (91), 54.9 (46), 43.0 (30), 41.0 (100), 40.2 (13).

б. На катализатор Ni⁰/MgO с массой 6 г при 100°C подавали вещество **1б** с расходом 0.3 л/(кг_{кат}·ч) и водород с расходом 190 л/кг_{кат}·ч. Конверсия 2-метилфурана **1б** 97.7%, селективность по продукту **2б** 96.6%, выход 94.4%.

Тетрагидрофурфуроловый спирт (2в). а. На катализатор Ni⁰/MgO массой 6 г при 200°C подавали альдегид **3** с расходом 0.3 л/(кг_{кат}·ч), прямооточно с ним одновременно подавали водород с расходом 210 л/кг_{кат}·ч. Конверсия альдегида **3** 98.5%, выход

52.7%. Масс-спектр (ЭУ), *m/e* (*I*_{отн}, %): 102.8 (5) [M + 1]⁺, 42.8 (14), 71.0 (100), 70.0 (11), 43.0 (52), 42.0 (12), 41.0 (50). **Фурфуроловый спирт (1в)**, выход 37.9%. Масс-спектр (ЭУ), *m/e* (*I*_{отн}, %): 98.8 (4) [M + 1]⁺, 97.8 (51) [M]⁺, 96.8 (10), 81.9 (9), 81.0 (100), 69.0 (11), 53.0 (10), 41.0 (4). **2-Метилтетрагидрофуран (2б)**, выход 3%.

б. На катализатор Ni⁰/MgO массой 6 г при 200°C подавали фурфуроловый спирт с расходом 0.3 л/(кг_{кат}·ч), прямооточно с ним одновременно подавали водород с расходом 210 л/кг_{кат}·ч. Конверсия субстрата **1в** 98.9%, выход 94.5%. **2-Метилтетрагидрофуран (2б)**, выход 5.3%

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-33-90117).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мохов В.М., Попов Ю.В., Панутина А.Н., Невыков Д.Н., Шишкин Е.В. // ЖОХ. 2019. Т. 89. Вып. 12. С. 1807; Mokhov V.M., Popov Yu.V., Panutina A.N., Nebykov D.N., Shishkin E.V. // Russ. J. Gen. Chem. 2019. Vol. 89. N 12. P. 2333. doi 10.1134/S1070363219120016
2. Nakagawa Y., Tamura M., Tomishige K. // ACS Catal. 2013. Vol. 12. N 3. P. 2655. doi 10.1021/cs400616p
3. Nagaraja B.M., Siva K.V., Shasikala V., Padmasri A.H., Sreedhar B., David R.B., Rama R.K.S. // Catal. Commun. 2003. Vol. 6. N 4. P. 287. doi 10.1016/s1566-7367(03)00060-8
4. Nagaraja B.M. // J. Mol. Catal. (A). 2007. Vol. 265. N 1–2. P. 90. doi 10.1016/j.molcata.2006.09.037
5. Stevens J.G., Bourne R.A., Twigg M.V., Poliakov M. // Angew. Chem. Int. Ed. 2010. Vol. 49. N 47. P. 8856. doi 10.1002/anie.201005092
6. Vetere V., Merlo A.B., Ruggera J.F., Casella M.L. // J. Br. Chem. Soc. 2010. Vol. 21. N 5. P. 914. doi 10.1590/s0103-50532010000500021
7. Nagaraja B.M., Siva Kumar V., Shasikala V., Padmasri A.H., Sreedhar B., David Raju B., Rama Rao K.S. // Catal. Commun. 2003. Vol. 4. N 6. P. 287. doi 10.1016/s1566-7367(03)00060-8
8. Yan K., Wu X., An X., Xie X. // Chem. Eng. Commun. 2013. Vol. 201. N 4. P. 456. doi 10.1080/00986445.2013.775646

9. Wettstein S.G., Alonso D.M., Gürbüz E.I., Dumesic J.A. // *Curr. Op. Chem. Eng.* 2012. Vol. 1. N 3. P. 218. doi 10.1016/j.coche.2012.04.002
10. Geilen F.M.A., vom Stein T., Engendahl B., Winterle S., Liauw M.A., Klankermayer J., Leitner W. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2011. Vol. 50. N 30. P. 6831. doi10.1002/anie.201007582
11. Nakagawa Y., Tomishige K. // *Catal. Surveys Asia*. 2011. Vol. 15. N 2. P. 111. doi 10.1007/s10563-011-9114-z
12. Seo G., Chon H. // *J.Catal.* 1981. Vol. 67. N 2. P. 424. doi 10.1016/0021-9517(81)90302-x
13. Ordonsky V.V., Schouten J.C., van der Schaaf J., Nijhuis T.A. // *Appl. Catal. (A)*. 2013. Vol. 451. P. 6. doi 10.1016/j.apcata.2012.11.013
14. Zhang B., Zhu Y., Ding G., Zheng H., Li Y. // *Gr. Chem.* 2012. Vol. 14. N 12. P. 3402. doi 10.1039/c2gc36270h
15. Khan F.A., Vallat A., Süß-Fink G. // *Catal. Commun.* 2011. Vol. 12. N 15. P. 1428. doi 10.1016/j.catcom.2011.05.024
16. Tike M.A., Mahajani V.V. // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2007. Vol. 46. N 10. P. 3275. doi 10.1021/ie061137m
17. Nakagawa Y., Tomishige K. // *Catal. Commun.* 2010. Vol. 12. N 3. P. 154. doi 10.1016/j.catcom.2010.09.003
18. Xiu S., Shahbazi A. // *Ren. Sust. En. Rev.* 2012. Vol. 16. N 7. P. 4406. doi 10.1016/j.rser.2012.04.028
19. Aycock D.F. // *Org. Proc. Res. Dev.* 2007. Vol. 11. N 1. P. 156. doi 10.1021/op060155c
20. Koso S., Nakagawa Y., Tomishige K. // *J. Catal.* 2011. Vol. 280. N 2. P. 221. doi 10.1016/j.jcat.2011.03.018
21. Koso S., Watanabe H., Okumura K., Nakagawa Y., Tomishige K. // *Appl. Catal. (B)*. 2012. Vol. 111. P. 27. doi 10.1016/j.apcatb.2011.09.015
22. Koso S., Watanabe H., Okumura K., Nakagawa Y., Tomishige K. // *J. Ph. Chem. (C)*. 2012. Vol. 116. N 4. P. 3079. doi 10.1021/jp2114225
23. Chen K., Mori K., Watanabe H., Nakagawa Y., Tomishige K. // *J. Catal.* 2012. Vol. 294. P. 171. doi 10.1016/j.jcat.2012.07.015
24. Amada Y., Watanabe H., Tamura M., Nakagawa Y., Okumura K., Tomishige K. // *J. Ph. Chem. (C)*. 2012. Vol. 116. N 44. P. 23503. doi 10.1021/jp308527f
25. Попов Ю.В., Мохов В.М., Небыков Д.Н., Щербакoва К.В., Донцова А.А. // *ЖОХ*. 2018. Т. 88. Вып. 1. С. 20; Попов Ю.В., Мохов В.М., Небыков Д.Н., Шчербакова К.В., Донцова А.А. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2018. Vol. 88. N 1. P. 20. doi 10.1134/S1070363218010048
26. Попов Ю.В., Мохов В.М., Латышова С.Е., Небыков Д.Н., Панов А.О., Плетнева М.Ю. // *ЖОХ*. 2017. Т. 87. Вып. 10. С. 1616; Попов Ю.В., Мохов В.М., Латышова С.Е., Небыков Д.Н., Панов А.О., Плетнева М.Ю. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2017. Vol. 87. N 10. P. 2276. doi 10.1134/S107036321710005X
27. Smith H.A., Fuzek J.F. // *J. Am. Chem. Soc.* 1949. Vol. 71. N 2. P. 415. doi 10.1021/ja01170a013
28. Koso S., Ueda N., Shinmi Y., Okumura K., Kizuka T., Tomishige K. // *J. Catal.* 2009. Vol. 267. N 1. P. 89. doi 10.1016/j.jcat.2009.07.010
29. Попов Ю.В., Мохов В.М., Латышова С.Е., Небыков Д.Н., Панов А.О., Давыдова Т.М. // *ЖОХ*. 2018. Т. 88. Вып. 10. С. 1585; Попов Ю.В., Мохов В.М., Латышова С.Е., Небыков Д.Н., Панов А.О., Давыдова Т.М. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2018. Vol. 88. N 10. P. 2035. doi 10.1134/S1070363218100018

Colloidal and Nanosized Catalysts in Organic Synthesis: XXIV. Study of Hydrogenation of Furan and Its Derivatives in the Presence of MgO-Supported Nickel and Cobalt Nanoparticles

Yu. V. Popov*, V. M. Mokhov, D. N. Nebykov, P. M. Shirkhanyan, T. A. Gendler, and V. V. Shemet

Volgograd State Technical University, Volgograd, 400006 Russia

*e-mail: tons@vstu.ru

Received December 20, 2019; revised December 20, 2019; accepted December 26, 2019

The processes of hydrogenation of furan and its derivatives (2-methylfuran, furfuryl alcohol, furfural) in plug-flow type reactor under atmospheric hydrogen pressure at 20–220°C in the presence of supported nickel nanoparticles prepared by chemical reduction were investigated. It was found that most active and stable in investigated reaction conditions are nickel nanoparticles, stabilized on magnesium oxide surface. This catalyst allows to obtain corresponding hydrogenation products with 100% yield and total conversion of raw materials.

Keywords: catalysis, nanoparticles, nickel, cobalt, furfural, furan